

^{87}Rb 原子の 5S-6P 遷移におけるマジック波長探索

量子・物質工学科 岸本研究室

0913118 吉野悠太

1. 目的と背景

我々の研究室では、 ^{87}Rb を用いた Bose-Einstein 凝縮体(BEC)の連続生成を目的としている。連続生成の鍵は、いかに極低温・高密度な原子集団を連続的に作るかに在る。

通常、 ^{87}Rb のレーザー冷却においては $5S_{1/2}$ - $5P_{3/2}$ 遷移間を用いている。これに加え、近年アルカリ金属原子においては、 nS -($n+1$) P 遷移を用いた冷却効果が K[1]及び Li[2] で確認されている。この遷移間を用いる利点は、狭線幅に由来する冷却の到達限界温度が低いことにある。

極低温原子を高密度に捕獲する方法として、光双極子トラップ(ODT)がある。一般に ODT のポテンシャルに対し、原子は十分冷却されていなければトラップすることはできない。通常の ^{87}Rb の $5S_{1/2}$ - $5P_{3/2}$ 遷移間の冷却では十分ではなく、いくつかの段階を経て ODT へと原子をロードしている。これに対し、我々はマジック波長[3]と呼ばれる特別な波長のレーザーを用いて ODT を行うことを考える。マジック波長において、基底状態と励起状態は等しく、同方向にシュタルクシフトする。これにより ODT 中心においても冷却サイクルが成り立つため、ODT 内での原子の連続的な冷却が可能になると考えられる。これを、より冷却が期待できる ^{87}Rb の $5S_{1/2}$ - $6P_{3/2}$ 遷移で行うことで、ODT のポテンシャルの深さ以下に温度が到達することが期待される。本研究では、 $5S_{1/2}$ - $6P_{3/2}$ 遷移間におけるマジック波長を同定することを目的としている。

2. 原理

2.1 $5S_{1/2}$ - $6P_{3/2}$ 遷移における冷却の利点

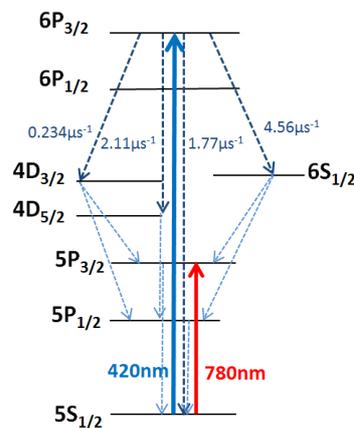


Fig.1. ^{87}Rb のエネルギー準位図

原子を捕獲、冷却する手法として磁気光学トラップ(MOT)がある。これは磁場勾配のある領域でレーザーを原子に対し対向させ、その輻射圧による Doppler 冷却を行うものである。この時 Doppler 冷却の到達限界温度は遷移間の自然幅 Γ に比例し $T_D = \hbar\Gamma/2k_B$ と表される。自然幅は、 $5S_{1/2}$ - $5P_{3/2}$ において $2\pi \times 6.0\text{MHz}$ [4]、 $5S_{1/2}$ - $6P_{3/2}$ において $2\pi \times 1.4\text{MHz}$ [4]であるため、1/4 程度到達限界温度が低く見積もられる。

加えて $5S_{1/2}$ - $6P_{3/2}$ 遷移では吸収の度合いを示す吸収断面積が小さいと考えられる。 $5S_{1/2}$ - $5P_{3/2}$ 遷移は閉じた二準位

のみで起こるが、 $5S_{1/2}-6P_{3/2}$ ではFig.1にあるように緩和の過程で枝分かれするため[4]、共鳴波長である420nmを吸収しにくいと考えられる。原子はある程度の密度になると、他原子の自然放出した光を再吸収する光誘起衝突が起こり、密度には限界がある。しかし $5S_{1/2}-6P_{3/2}$ 遷移間では光誘起衝突が抑えられるため密度の向上が期待できる。

2.2 ACシュタルクシフトとマジック波長

本研究室では、BECを生成する過程で極低温原子を保存する場として光双極子トラップ(ODT)を用いる。これは、強度に位置依存の勾配を持たせ原子に照射することで、強度の極大近傍に原子を捕獲するものである。原子と振動電場との相互作用により、原子の準位はシフトする。これはACシュタルクシフトと呼ばれるものである。一般に二準位で考えた場合、シュタルクシフトの大きさは等しく、方向は逆向きである。しかし実際は、ある準位に対する許容遷移の寄与を考えなくてはならない。準位*i*に対するシュタルクシフトは、各許容遷移間のシフトの和として、

$$\Delta E_i = \frac{\pi c^2 I(r, z)}{2} \sum_{f \neq i} \frac{2J'+1}{2J+1} \frac{A_{if}}{\omega_{if}^3} \left(\frac{1}{\omega_{if} - \omega} + \frac{1}{\omega_{if} + \omega} \right)$$

と表される。ここで A_{if} はEinsteinのA係数、 ω_{if} 、 ω は各準位間の共鳴周波数、及びレーザーの周波数、 $I(r, z)$ はレーザーの強度である。これからわかるように、シュタルクシフトはレーザーの波長、及び強度に依存する。今回我々は $5S_{1/2}-6P_{3/2}$ 遷移間のシュタルクシフトの計算を、ビーム半径を $80 \mu\text{m}$ 、出力を 6W として行った。 A_{if} 及び ω_{if} はNIST database[3]及びKurucz database[5]から引用した。

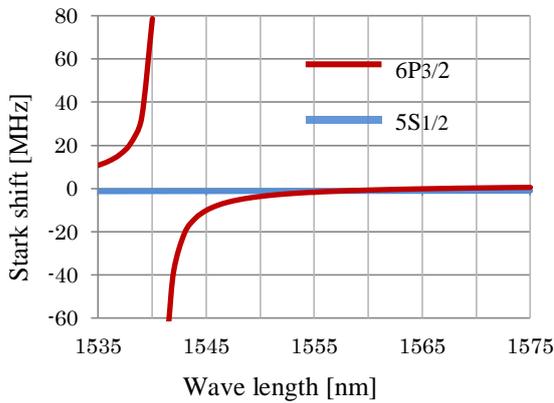


Fig.2. $5S_{1/2}$, $6P_{3/2}$ におけるシュタルクシフトの波長依存

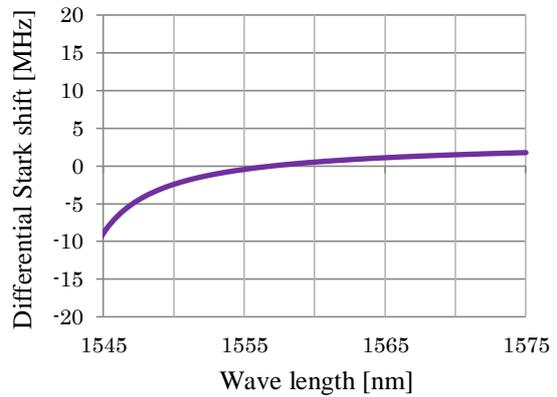


Fig.3. $5S_{1/2}$, $6P_{3/2}$ におけるシュタルクシフトの差分

Fig.2には $5S_{1/2}$ 、 $6P_{3/2}$ それぞれにおけるシュタルクシフトの波長依存を、Fig.3には二準位のシフトの差分を示した。これから分かるように1555~1560nm近傍において2つの差分がゼロになる。これは $5S_{1/2}$ 、 $6P_{3/2}$ が等しく、同方向にシュタルクシフトすることを示している。この時のレーザーの波長を一般にマジック波長と呼ぶ。

3.実験：マジック波長の探索

3.1 実験の原理

今回我々はシュタルクシフトを観測する手段として Fig.4 にあるように、420nm 波長レーザーによる飽和吸収分光の系を組み、対向する2本のレーザーに1.5 μm 波長のファイバーレーザーを重ねた。飽和吸収分光法は、pump 光によって吸収が飽和している原子に対し probe 光を照射し photo detector で検出することにより、超微細構造までの分光を可能にしたものである。我々はまず通常の飽和吸収分光を行い、吸収線の誤差信号を検出した。ここで1.5 μm 波長のファイバーレーザーを照射することで、原子はシュタルクシフトし共鳴周波数が変化するため、検出する誤差信号はシュタルクシフトの大きさ、方向に依存しシフトする。このシフト量がゼロになる時がマジック波長である。実験系は、Rubidium cell の中心で420nm 波長レーザーのビーム半径 W_0 が40 μm 、1.5 μm 波長のファイバーレーザーが80 μm となるように設計した。ファイバーレーザーのアンプは1537nm から1575nm に対応しており、出力は6W で測定を行った。

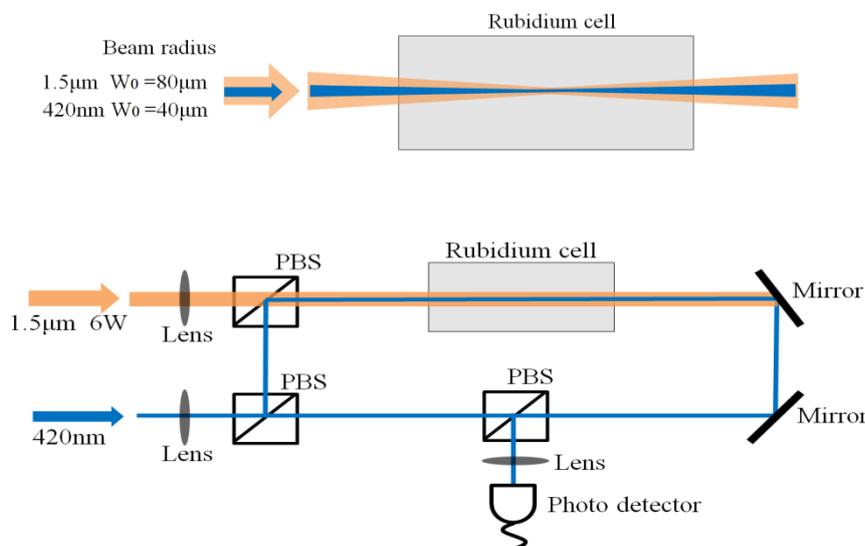


Fig.4. マジック波長探索における実験系

3.2 実験結果

今回、吸収線の誤差信号は1.5 μm 波長のレーザーを照射することにより、波長依存のシフトが観測された。以下の Fig.5 と Fig.6 に結果を示す。

信号のシフトの波長依存は概ね Fig.2 と一致した。1541nm 付近でシフトの正、負が切り替わるのは、 ^{87}Rb における6P-7D 遷移の共鳴波長が1541nm によるためだと考えられる。今回の結果では、シフト量は見積もりの1/4程度であった。このため、1550nm から1570nm の間はシフトが測定できなかった。この原因としては、1.5 μm 波長レーザーに対する probe 光のビーム径が大きいため、またビームの重なりが完全ではないため、シュタルクシフトの小さな領域も同時に検出しているためだと考えられる。

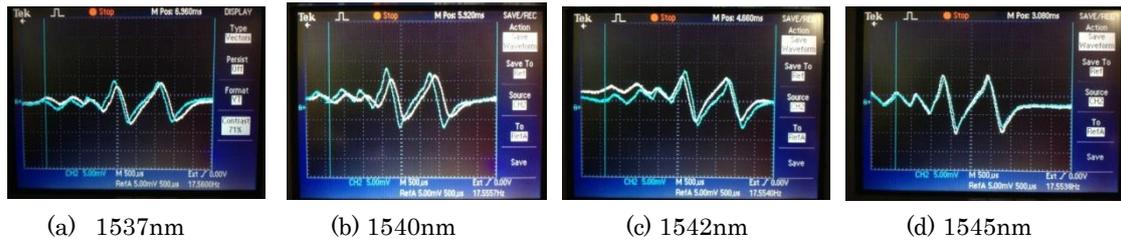


Fig.5. 観測された飽和吸収線の誤差信号のシフト
 青は通常の誤差信号 白は 1.5 μm 波長レーザーを照射した際の誤差信号を示す

